会议主题：加速器和核探测仪器及制靶技术

用于逆运动学（^{3}He, t）电荷交换反应实验的探测系统的设计与模拟优化

何志轩[1]，李蒙[2]，卜文娟[1]，杨贺润[3]，胡碧涛[1]，张毅[1,†]

(1. 兰州大学核科学与技术学院，兰州 730000；
2. 中南大学湘雅二医院，长沙 410000；
3. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000)

摘要： 中能区电荷交换反应可以从自旋-同位旋激发的角度研究原子核复杂结构。利用中国科学院近代物理研究所的放射性束流线，利用逆运动学方法进行电荷交换反应实验，可以将研究的对象核素拓展至丰中子核乃至不稳定核。基于此，设计了用于电荷交换反应实验的探测器系统，该系统主要包括了 ^{3}He 气体靶、TPC 和 CsI(Tl) 阵列，其中 TPC 和 CsI(Tl) 阵列构成 ΔE-E 系统。利用 Geant4、Garfield++ 等模拟软件，优化了 TPC 的工作条件，确定了实验研究的运动学区间和探测器的基本设计，考察了探测系统的粒子鉴别能力。基于模拟优化，搭建了探测系统。

关键词： 探测系统；Geant4；模拟；电荷交换反应
中图分类号： O571.1　　**文献标志码：** A　　**doi：**

1 引言

电荷交换反应是一种可以从自旋-同位旋激发的角度研究原子核复杂结构的实验探针[1]。其中，(^{3}He, t)、(t, ^{3}He)、(d, ^{2}He) 等反应是电荷交换反应研究中的常规实验手段，具有高分辨率、高探测效率等优点。利用加速器产生 ^{3}He 和 t 束流，已经展开了一系列核素的 (^{3}He, t) 和 (t, ^{3}He) 电荷交换反应实验[2]，在原子核的自旋-同位旋激发、巨共振、β 衰变、中子皮厚度等方向的研究取得了丰硕成果。然而，由于实验设计的限制，迄今为止的电荷交换反应实验研究绝大部分局限于稳定核素，利用逆运动学方法对非稳定核素进行电荷交换反应实验仍在技术上面临巨大挑战，当然也充满机遇。美国密歇根州大学的研究团队首次成功通过逆运动学 (d, ^{2}He) 反应从不稳定性原子核中提取了 β^+方向的 Gamow-Teller 跃迁强度 B(GT)；实验方案基于活性靶时间投影室和磁谱仪的使用，为解决一系列科学难题开辟了道路[3-4]。北京航空航天大学的研究团队提出利用逆运动学，对不稳定核素的电荷交换反应总截面进行系统测量，并试图将总截面与总 B(GT) 之间建立联系[5]。基于此，我们提出利用中国科学院近代物理研究所的加速器装置[6]产生的放射性束流轰击 ^{3}He 靶，开展逆运动学 (^{3}He, t) 电荷交换反应实验，以将研究核素范围拓展到不稳定丰中子核素。因此，

收稿日期： yyyy-mm-dd；**修改日期：** yyyy-mm-dd
基金项目： 国家自然科学基金资助项目 (U2032166, 11875301, U1832167)；国家重点研发计划项目 (2022YFE0103900)
作者简介： 何志轩(1996—)，男（汉族），四川广元人，博士研究生，从事实验核物理研究；E-mail: hezhx21@lzu.edu.cn
† **通信作者：** 张毅，E-mail: yizhang@lzu.edu.cn

我们设计并搭建了用于探测大角度散射 t 的探测系统，以验证利用重离子束流进行逆运动学 (^{3}He, t) 实验的可行性[7]。探测系统基于 ΔE-E 望远镜。时间投影室 (TPC) 具有较低的能量阈值、较高的探测效率、较好的能量分辨和位置分辨 (特别是散射角 θ 分辨)，能够精确测量带电粒子的能量损失以及重建三维径迹，且相比硅条探测器等更经济实惠，便于大尺寸加工。此外，TPC 的工作气体本身就可以成为靶，即活性靶 TPC (AT-TPC)，这一点在开展核物理实验方面具有显著的优势和潜力[8]。因此，采用 TPC 作为 ΔE 探测器。

本文主要论述了探测器的设计与模拟优化。首先，我们根据物理目标设计了探测器的基本结构；然后，基于运动学计算和 Geant4、Garfield++、COMSOL 等软件，模拟了探测器的基本结构和反应本底，并据此优化探测器的设计方案，确定了探测器研究的运动学区。最后结合模拟优化分析，完成了探测系统的搭建。

2 实验总体设计

如图 1(a) 所示，探测系统主要包括：^{3}He 气体靶、TPC、CsI(Tl) 闪烁体阵列、前端电子学和数据采集系统组成。重离子束流轰击 ^{3}He 靶发生电荷交换反应产生 t，具有一定动能的散射 t 穿过 TPC，然后在闪烁体中沉积能量。在实际碰撞过程中，可能会产生其他副产物。由 TPC 和 CsI(Tl) 阵列构成的 ΔE-E 系统可以进行粒子鉴别以甄别 t。采用基于厚型电子倍增器 (THGEM)[9-10] 的 TPC 作为 ΔE 探测器，可以精确地测量带电粒子的三维径迹和能损[11]；E 探测器是 CsI(Tl)，能够有效地探测带电粒子的剩余能量[12]。

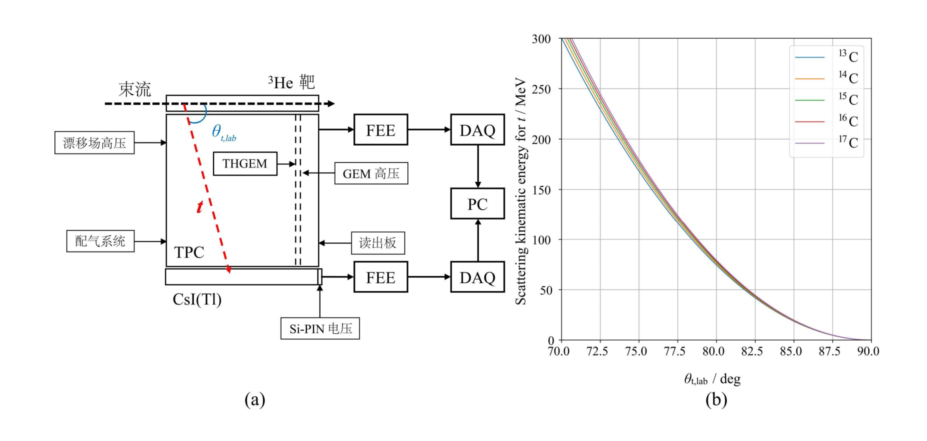


图 1 探测系统整体框图 (a) 及 t 的散射动能与散射角的关系 (b)

如果不考虑同位旋的翻转和末态粒子的激发能，电荷交换反应可以被看作弹性散射。基于重离子和轻核 (^{3}He) 弹性碰撞的相对论运动学计算，给出 t 的散射能量和实验室系散射角 ($\theta_{\mathrm{t,lab}}$) 的关系，如图 1(b) 所示。$\theta_{\mathrm{t,lab}}$ 接近 90°时，对应于质心系散射角 ($\theta_{\mathrm{t,c.m.}}$) 接近 0°，动量转移接近零；但是小角散射 t 的动能太低，难以克服靶的自吸收，所以在实验中难以测到这一区间，可以根据实际测到的散射角向 $\theta_{\mathrm{t,c.m.}} = 0$ 处外推。随着 $\theta_{\mathrm{t,lab}}$ 减小，t 散射动能增大，需要更厚的 CsI(Tl) 晶体才能使其能量完全沉积。因此，实验研究的运动学区间，需要结合探测器的具体设计，进一步地模拟优化和考虑。

3 模拟优化

3.1 TPC 模拟

带电粒子穿过 TPC，电离工作气体产生电子-离子对。电子在电场驱动下向 THGEM 方向漂移，并在穿过 THGEM 微孔时发生雪崩放大，雪崩电子进入收集区被读出电极收集产生信号。在电子的漂移、雪崩等过程中，TPC 工作气体的特性、THGEM 的增益等会影响探测器性能[13]，因此前期模拟优化尤为重要。我们采用 Garfield++模拟电子在工作气体中的特性[14]。电子在 Ar + iC_4H_{10} 中的漂移速度模拟结果如图 2(a) 所示。在 TPC 中，希望电子漂移速度受约化场强的影响较小，这样即使电场出现轻微波动，漂移速度也不会变化剧烈。Ar (95%) + iC_4H_{10} (5%) 是一种合适的工作气体；当漂移区的电场强度为 200 V/(cm·atm) 时，电子的漂移速度接近饱和，约为 4.2 cm/μs；而 iC_4H_{10} 比例更大，则需要更高的电场才能达到饱和速度。同时，采用 COMSOL[15]和 Garfield++模拟电子在工作气体中从产生到收集的整个过程，给出 THGEM 合适的电压配置的参考。模拟结果如图 2(b) 所示，雪崩增益随 THGEM 膜压差的增大而指数增加；其中，Ar (95%) + iC_4H_{10} (5%) 气体在较低的电压下就能实现高雪崩增益；在双层 THGEM 工作时，单层电压不需要加很高就可以实现高增益，有效避免打火等情况发生。

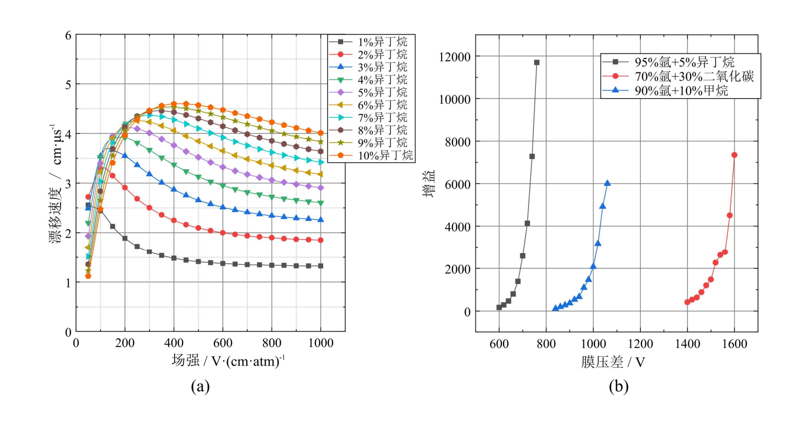


图 2 Garfield++模拟的 Ar + iC_4H_{10} 的电子漂移速度 (a) 及单层 THGEM 总增益与膜压差的关系 (b)，模拟在常温常压下进行

考虑 TPC 是一个不规则的形状，且对电场均匀性要求高，需要设计专用场笼。场笼电极采用印刷电路板工艺，因其便于加工成不同的形状。然后利用 COMSOL 计算场笼的电场，确定场笼设计：场笼采用双面敷铜的 PCB 制作，内外电极条的条宽均是 1.5 mm，条间隙为 0.5 mm，电极条中心的周期为 2 mm；内外电极是交错排布的镜像结构。在 COMSOL 内设置参考线提取电场分布。参考线平行于阴极板，位于场笼中间位置，分别统计参考线上距离内场笼边缘 2、5、10 mm 之内的电场强度。计算结果显示，距离场笼边缘 2 mm 处的电场强度的不均匀性约为 2‰，距离场笼 5 mm 处的电场强度的不均匀性能够达到 0.1‰。靠近边缘 5 mm 之内的电场有微小畸变，对于 20 ~ 150 MeV 散射的 *t*，会在 5 mm 的工作气体中损失约 5 ~ 30 keV 能量，约为在 TPC 中总能量沉积的 2.5%，可以在数据处理时修正或舍弃；场笼内其余区域的电场畸变很小，可以认为是有效漂移场区。若将距离场笼 5 mm 范围内的电场视为畸变电场，畸变场区约占 5%，均匀场区约占 95%。

3.2 Geant4 模拟

基于 Geant4[16]，我们开发了一套蒙特卡罗模拟软件包来确定探测系统的结构及运动学。利用 Geant4 构建的探测器系统如图 3(a) 所示，中心蓝色圆柱是封装 3 个大气压 ^{3}He 气体的不锈钢腔体。重离子束穿过 ^{3}He 气体后的束斑直径约为 30 ~ 40 mm，故气体靶半径设置为 24.8 mm，不锈钢壁厚为 0.2 mm。中间黄色半圆柱是 TPC，主要包括场笼和工作气体，如图 3(b) 所示。TPC 内半径为 25 mm，外半径为 197 mm。场笼结构中间为厚度 0.66 mm 的 FR4 基材，基材两侧的覆铜厚度均为 0.02 mm。场笼之内填充一个大气压的 Ar(95%) + C_4H_{10}(5%) 气体。最外层为 CsI(Tl) 闪烁体阵列，红色部分为 CsI(Tl) 晶体，厚度 20 mm，长 200 mm；表面白色部分为 0.135 mm 厚的 Teflon 反射层。

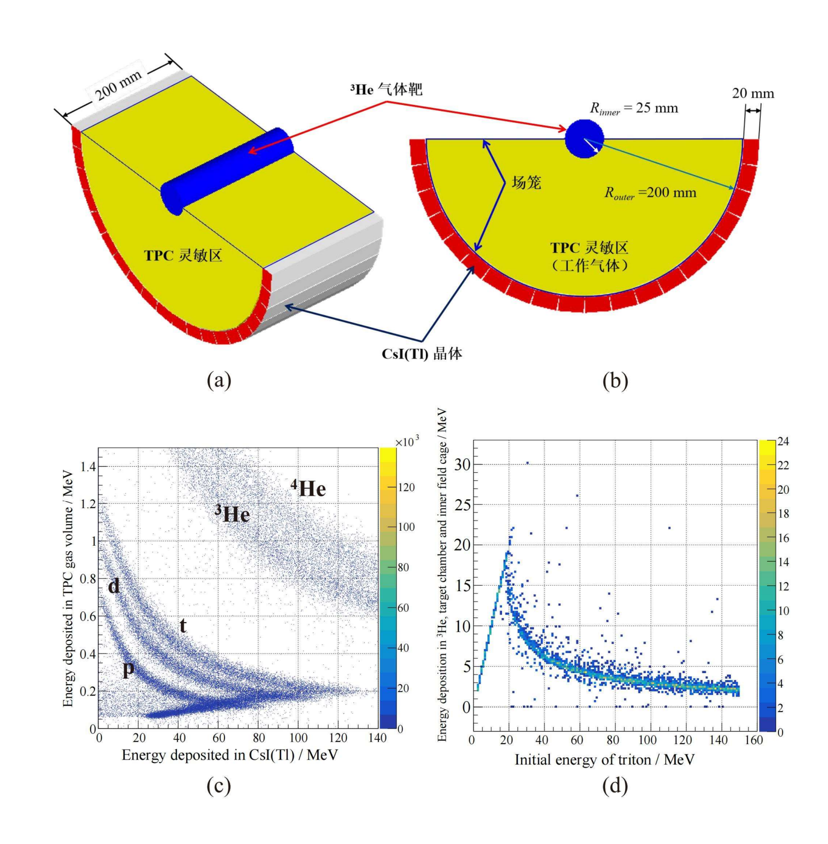


图 3 Geant4 模拟的探测系统结构立体图 (a)，剖面图 (b) 和 ΔE-E 分布 (c) 以及 t 在 ^{3}He 气体、不锈钢腔体以及内层场笼中的能量沉积与初始动能的关系 (d)

首先，我们进行“快模拟”，直接从靶“体积” (Volume) 中生成 t 以及 p、d、^{3}He 及 α 粒子等产物，以考察探测系统能探测的能量范围以及粒子鉴别能力。将碰撞视为弹性散射过程，t 粒子遵循图 1(b)中的散射能量和角度的相关性。为了简化模拟过程，p、d、^{3}He 及 α 粒子等产物粒子的能量-角度关系与 t 相同。将 TPC 工作气体和 CsI(Tl) 晶体指定为“灵敏探测器” (Sensitive detector)，分别提取带电粒子在其中的能量沉积。假设 TPC 和闪烁体的典型能量分辨率分别为 10%和 8%，模拟的 ΔE-E 分布如图 3(c) 所示，t 和其他副产物可以被清楚地区分。在这种探测器设计下，可探测到的 t 最大能量约为 130 MeV。t 的初始动能和在 ^{3}He 气体、不锈钢腔体以及内层场笼中的能量沉积之和的关系如图 3(d) 所示，t 克服靶的自吸收且穿出不锈钢侧壁进入 TPC，需要 20 MeV 的能量；出射 t 的能量越高，在探测器死区损耗的能量越小。因此，该

探测器设计适用于动能约为 20～130 MeV 的 t，对应的散射角约为 76°～86°。

在确定了探测系统的设计后，为了考察重离子打靶的反应本底，我们模拟了 500 MeV/nucleon ^{17}C 束流轰击 ^{3}He 气体靶的过程。Geant4 的物理过程采用 FTFP_BERT_ATL 物理列表。^{17}C 束流沿 z 方向，并以 z 轴为中心、半径 20 mm 的圆面分布入射到 ^{3}He 气体靶中。Geant4 的模拟并不能细致地给出电荷交换反应的截面，特别是涉及到反应机制的自旋-同位旋激发的过程，而是将反应视作弹性散射或非弹性散射给出重离子与靶核碰撞产生 t 以及其他副产物粒子的统计性描述。根据模拟重建的 ^{17}C-^{3}He 碰撞产物的 ΔE-E 分布曲线图（见图 4），在 76°～86°的出射角范围内，可以清楚地区分出各种带电粒子。考虑束流强度为 10^6 pps，模拟给出的产物粒子的计数率如表 1 所示。产量最大的是质子，而弹性散射的产物 ^{3}He 则相当小。因此，我们认为 ^{3}He 极有可能被 500 MeV/nucleon 的重离子束打碎，从而导致质子和氘核计数占主导地位。尽管与质子和氘核相比，t 的产额较小，每秒约有 32 个事例，但它仍然能够被有效测量和甄别。探测器设计的合理性得到了验证。同时，尽管碰撞产生的总事件数较高，但是探测器实际上接受的有效计数率约为 1000 pps，对于探测器和电子学的响应要求不高。

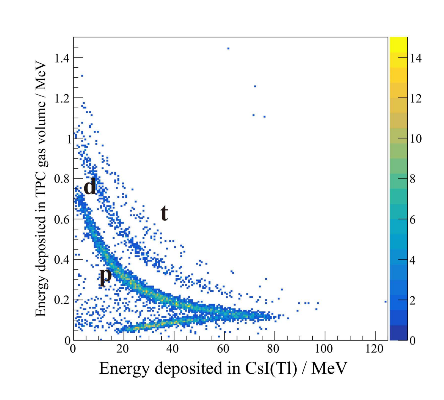


图 4 Geant4 模拟重离子打靶的产物粒子 ΔE-E 分布

表 1 Geant4 模拟的带电粒子计数率

粒子种类	p	d	t	^{3}He	α
总计数率 / s^{-1}	15723	2689	1211	244	1688
有效计数率 / s^{-1}	1107	206	32	6	14

表注：总计数率为所有散射角下产生的事例；有效计数率为散射角 76°～86°、且被探测系统测到的事例。

4 TPC 搭建

基于模拟优化，我们搭建了用于电荷交换反应实验的探测器系统。TPC 探测器[17]主要包括阴极板、场笼、THGEM 膜和阳极读出板，如图 5 所示。阴极是一块单面敷铜的 PCB 板，加载负高压，并与场笼第一个电极条连通。场笼整体呈半圆形结构，内场笼半径 25 mm，外场笼半径 200 mm，外场笼用模具和紫外

固化胶固定成型，内场笼用铝合金模具压模成成型，内外场笼焊接成一体。TPC 读出探测器采用我们设计、中国科技大学加工的 THGEM。THGEM 灵敏区面积约为 270 cm^2，为了减少打火信号的大小，在 THGEM 一个覆铜面上做了分区处理，分为 6 个扇形区域。读出电极采用 zigzag 构型 pad，总有效通道数 886 个。灵敏区 pad 在平行入射粒子方向为 7.5 mm 的长边，垂直入射粒子方向为 4 mm 的短边。读出电子学和数据获取系统采用中国科技大学研制的基于 AGET 芯片的电子学系统[18]。

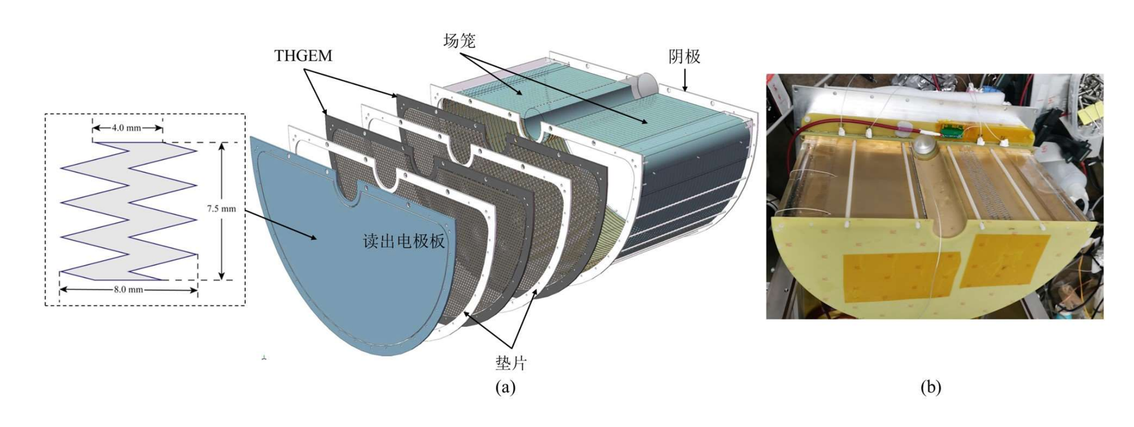


图 5 TPC 的主要结构：(a) TPC 结构示意图 (虚线框中为读出 pad 形状)，(b) TPC 实物图

5　总结与展望

本文基于计算和模拟，完成了用于逆运动学 (^{3}He, t) 电荷交换反应的 TPC-CsI(Tl) 探测系统的设计及优化。首先，讨论了实验对探测系统的设计要求。考虑到 TPC 作为 ΔE 探测器，其性能要求较高，我们利用 Garfield++、COMSOL 等软件，模拟了 TPC 的工作特性；模拟显示 Ar (95%) + iC_4H_{10} (5%) 混合气体具有电子漂移速度快、扩散系数小、工作电压低等优点，从而被选为 TPC 工作气体。经过电场分析和电子输运模拟，确定了场笼的镜像电极设计细节以及 THGEM 的工作电压。结合 Geant4 模拟，确定了探测器的尺寸、工作动态范围等，考察了其粒子鉴别能力。同时，利用 Geant4 模拟重离子束流轰击靶核的过程，讨论了碰撞条件下的产物粒子的种类、能量分布及计数率，也即反应本底的分布。最终，确定了探测器适用于测量散射角约为 76° ~ 86°、散射动能约为 20 ~ 130 MeV 的 t。在模拟优化的基础上，完成了 TPC 探测器部分的搭建。

下一步拟在中国科学院近代物理研究所 RIBLL 2 束流线及外靶终端展开不稳定核素的电荷交换反应实验。较大尺寸的 TPC 有利于实现较高的角分辨，考虑粒子径迹长 20 cm，漂移方向的位置分辨好于 2 mm，即可实现实验室系 0.5°的角分辨。根据反冲 t 核的能量-角度关系，利用“缺失质量法”重建不稳定核素的激发态。在 TPC-CsI(Tl) 系统探测大角度散射 t 粒子的同时，利用 RIBLL 2 束流线及外靶终端现有实验装置探测出射重核产物，实现一定角度范围内的全举测量，利用时间戳在离线分析时重建符合事件，筛选出电荷交换反应的产物粒子，可较好地扣除本底。利用束线探测器可以探测质心系小角度范围的重核产物，结合理论模型分析及实验测量的较大角度的反应截面角分布，更准确地外推得到核反应在质心系小角度不同

共振态的反应截面。

参考文献 (References)

[1] FUJIMURA H, AKIMUNE H, DAITO I, *et al.* Phys Rev **C**, 2004, **69**: 064327. doi: 10.1103/PhysRevC.69.064327

[2] ZEGERS R G T, AKIMUNE H, AUSTIN S M, *et al.* Phys Rev **C**, 2006, **74**: 024309. doi: 10.1103/PhysRevC.74.024309

[3] GIRAUD S, ZAMORA J C, ZEGERS R G T, *et al.* Nucl Instrum Meth **A**, 2023, **1051**: 168213. doi: 10.1016/j.nima.2023.168213

[4] GIRAUD S, ZAMORA J C, ZEGERS R G T, *et al*. Phys Rev Lett, 2023 **103**: 232301. doi: 10.1103/PhysRevLett.130.232301

[5] ZHANG J C, SUN B H. Nuclear Physics Review, 2020, **37**(3): 438-446 (in Chinese).

(张寂潮，孙保华. 原子核物理评论, 2020, **37**(3): 438-446. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC69)

[6] FANG F, TANG S W, WANG S T, *et al.* Nuclear Physics Review, 2022, **39**(1): 65-72 (in Chinese).

(方芳，唐述文，王世陶，等. 原子核物理评论, 2022, **39**(1): 65-72. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2021035)

[7] ZHANG Y, HU B T. Nuclear Physics Review, 2019, **36**(2): 151-160 (in Chinese).

(张毅，胡碧涛. 原子核物理评论, 2019, 36(2): 151-160. doi: 10.11804/NuclPhysRev.36.02.151)

[8] LIU W, LOU J L, YE Y L, *et al*. Nucl Sci Tech, 2020, **31**: 20. doi: 10.1007/s41365-020-0731-y

[9] BRESKIN A, ALON R, CORTESI M, *et al*. Nucl Instrum Meth **A**, 2009, **598**(1): 107-111. doi: 10.1016/j.nima.2008.08.062

[10] BRESKIN A, CORTESI M, ALON R, *et al.* Nucl Instrum Meth **A**, 2010, **623**: 132. doi: 10.1016/j.nima.2010.02.172

[11] WEI X L, LU C G, ZHANG J W, *et al*. Nuclear Physics Review, 2020, **37**(3): 765-770 (in Chinese).

(魏向伦，鲁辰桂，张俊伟，等. 原子核物理评论, 2020, **37**(3): 765-770. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC46)

[12] FANG F, YUE K, SUN Z Y, *et al*. Nuclear Physics Review, 2017, **34**(2): 184-189 (in Chinese).

(方芳，岳珂，孙志宇，等. 原子核物理评论, 2017, **34**(2): 184-189. doi: 10.11804/NuclPhysRev.34.02.184)

[13] SAULI F, Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Pres, 2014: 292-326. doi: 10.1017/CBO9781107337701

[14] Garfield++, https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/

[15] COMSOL Multiphysics, https://cn.comsol.com/comsol-multiphysics

[16] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instrum Meth Phys A, 2003, **506**(3): 250-303. doi: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8

[17] 李蒙，用于(^{3}He, *t*)电荷交换反应实验研究的时间投影室的研制[D], 兰州：中国科学院近代物理研究所, 2022(9): 51-66.

[18] LI C, FENG C Q, ZHU D Y, *et al.* JINST, 2018, **13**: P04013. doi: 10.1088/1748-0221/13/04/P04013

Design and Simulation of Detection System for (^{3}He, *t*) Charge Exchange Reaction Experiment in Inverse Kinematics

HE Zhixuan[1], LI Meng[2], BU Wenjuan[1], YANG Herun[3], HU Bitao[1], ZHANG Yi[1,†]

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

2. Department of Oncology, The Second Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410011;

3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract: Charge exchange reactions with the intermediate energy can be used to study the complex structure of atomic nuclei from the respect of spin-isospin excitation. By utilizing the radioactive beam line at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, charge exchange reaction experiments in inverse kinematics can expand the target nuclides to be studied to neutron-rich nuclei and even unstable nuclei. Based on this, a detector system for charge exchange reaction experiments has been designed, which mainly consists of a ^{3}He gas target, TPC and CsI(Tl) arrays, where the TPC and CsI(Tl) arrays form a ΔE-E system. Using simulation software such as Geant4 and Garfield++, the operating conditions of the TPC were optimized, the kinematic intervals and the basic design of the detector for the experimental study were determined, and the particle discrimination ability of the detection system was investigated. Based on the simulation, the detection system was built.

Key words: Detection system; Geant4; Simulation; Charge exchange reaction

Received date: yyyy-mm-dd; **Revised date:** yyyy-mm-dd

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U2032166, 11875301, and U1832167); National Key R&D Program of China (2022YFE0103900)

† **Corresponding author:** Yi Zhang, E-Mail: yizhang@lzu.edu.cn